



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

A. Möckel, R. Schuder

Optimierung der Kommutierung von Dauermagnetmotoren

Einleitung

Trotz der Erfolge und des Fortschritts der Elektronikentwicklung und der Bemühung, den bürstenlosen Gleichstrommotor (brushless DC / BLDC-Motor / Elektronikmotor) einem breiteren Anwendungsgebiet zuzuführen, ist der permanentmagneterregte Kommutatormotor nicht aus der Massenproduktion wegzudenken. Der Permanentmagnetmotor behält nach wie vor einen festen Platz auf dem Gebiet der Stell- und Hilfsantriebe bei Anwendungen mit sporadischer Einschaltdauer, wenngleich auch Anwendungen mit nahezu Dauerbetrieb bekannt sind. Daneben ist ein klarer Trend zu erkennen, Reihenschlussmotoren durch Permanentmagnetmotoren abzulösen. Dabei spielt vor allem der Gedanke, die Stromwärmeverluste der Erregerwicklung zu umgehen, eine wichtige Rolle. Zusätzlich verstärkt wird diese Entwicklungsrichtung durch die zunehmend günstig zur Verfügung stehenden Akkumulatoren hoher Leistungsdichte und dem Wunsch nach transportablen Geräten hoher Leistung im Bereich der Elektrowerkzeuge und Haushaltgeräte.

Problemstellung

Der Kernpunkt der Entwicklung von permanentmagneterregten Kommutatormotoren liegt in der Beherrschung der Stromkommutierung. Sie bestimmt die Lebensdauer als auch weitere wichtige Eigenschaften des Motors, wie die Funkstörung und zum Teil auch das Betriebsgeräusch. Die Kenntnis um die besonderen Eigenschaften der Permanentmagneterregung im Bezug auf die Kommutierung und eine Möglichkeit der experimentellen Optimierung sind deshalb von großem Interesse. Wie gezeigt werden kann, entsteht ein besonderes Problem, wenn in einer bestehenden Applikation ein Reihenschlussmotor durch einen Permanentmagnetmotor ersetzt werden soll und vergleichbare Betriebseigenschaften erreicht werden müssen.

Vorüberlegungen

Beim Permanentmagnetmotor sind im Hinblick auf die Kommutierung besonders das vom Motorstrom nahezu unabhängige Erregerfeld und der relativ breite magnetisch wirksame Luftspalt kennzeichnend. Die magnetische Leitfähigkeit der Magnete ist der Luft gleichzusetzen. Während der magnetisch breite Luftspalt für die Kommutierung nicht von Nachteil ist, muss dem vom Motorstrom weitgehend unabhängigen konstanten Erregerfeld erhöhte Aufmerksamkeit zu Teil werden. Wie beim Reihenschlussmotor ist auch beim Permanentmagnetmotor Wert auf eine geringe Streuinduktivität der kommutierenden Spule zu legen. Wird eine Optimierung für eine definierte Drehrichtung vorgenommen, kann zur Kompensation des Streufeldes der kommutierenden Spule und zur Beschleunigung der Kommutierung das Ankerfeld gegenüber dem Erregerfeld entgegen der Motordrehrichtung verdreht werden.

Ein Problem entsteht insbesondere beim Permanentmagnetmotor, wenn sehr unterschiedliche mechanische Lasten oder Arbeitspunkte abgedeckt werden müssen. Ist die Verdrehung für einen speziellen Arbeitspunkt optimiert, kann, wenn es die magnetischen Gegebenheiten zulassen, eine nahezu vollständige Kommutierung in einem dem Kommutatormotor typischen Streubereich realisiert werden. Wird von diesem Arbeitspunkt ausgehend die mechanische Belastung vergrößert, fällt die Drehzahl, hervorgerufen durch den Ankerwiderstand, etwas ab und der zu kommutierende Strom steigt. Im Zusammenhang mit der zurückgehenden Drehzahl nimmt die rotatorisch vom Erregerfeld induzierte kommutierungsfördernde Spannung im Kommutierungskreis ab. Die Kommutierung verläuft zunehmend unterkommutiert. Steigert man die mechanische Belastung weiter, kann sich das verstärkende Bürstenfeuer bis zum Rundfeuer entwickeln.

Wird vom optimierten Arbeitspunkt ausgehend die Belastung in Richtung Leerlauf verringert, sinkt der Motorstrom und die Drehzahl steigt wegen des verringerten ohmschen Spannungsabfalls im Ankerkreis. Die rotatorische Komponente vom Erregerfeld nimmt zu. Im Gegensatz dazu wird der zu kommutierende Ankerzweigstrom kleiner. Die Folge ist eine zunehmende Überkommutierung, die der Lebensdauer der Bürste ebenfalls nicht zuträglich ist.

Jeder Bürste ist beim Permanentmagnetmotor eine feste Polarität zugeordnet. Im überkommutierten Fall verschleißt die Bürste mit positiver Polarität schneller, bei Unterkommutierung die der negativen Polarität. Die Ursache liegt in der Richtung des Lichtbogens beim Öffnen des Kommutierungskreises. Die Richtung ist davon abhängig,

ob im Augenblick des mechanischen Öffnens des Kommutierungskreises der Strom bereits über den Wert des Ankerzweigstroms gestiegen ist oder ob er kleiner ist. Dementsprechend gerichtet ist die Richtung der Spannung, die einen Strom über einen Lichtbogen treibt. Im Fall der Unterkommütierung trifft der Lichtbogen auf die Bürstenoberfläche der negativen Bürste und erodiert diese. Bei Überkommütierung trifft er auf die Bürste mit positiver Polarität. Können die Kommutierungsbedingungen nicht günstiger gestaltet werden, ist eine Mischbestückung beider Polaritäten üblich, um den unterschiedlichen Verschleiß auszugleichen. Das Bild 1 zeigt die den Lichtbogen betreffenden Polaritäten. Aus den Untersuchungen auf dem Gebiet der Energietechnik wird die Erkenntnis übernommen [1], dass das Kathodengebiet thermisch wesentlich stärker belastet wird. Der auch praktisch auftretende höhere Verschleiß des Kathodengebietes bestätigt die Gültigkeit für den Bürstenkontakt.

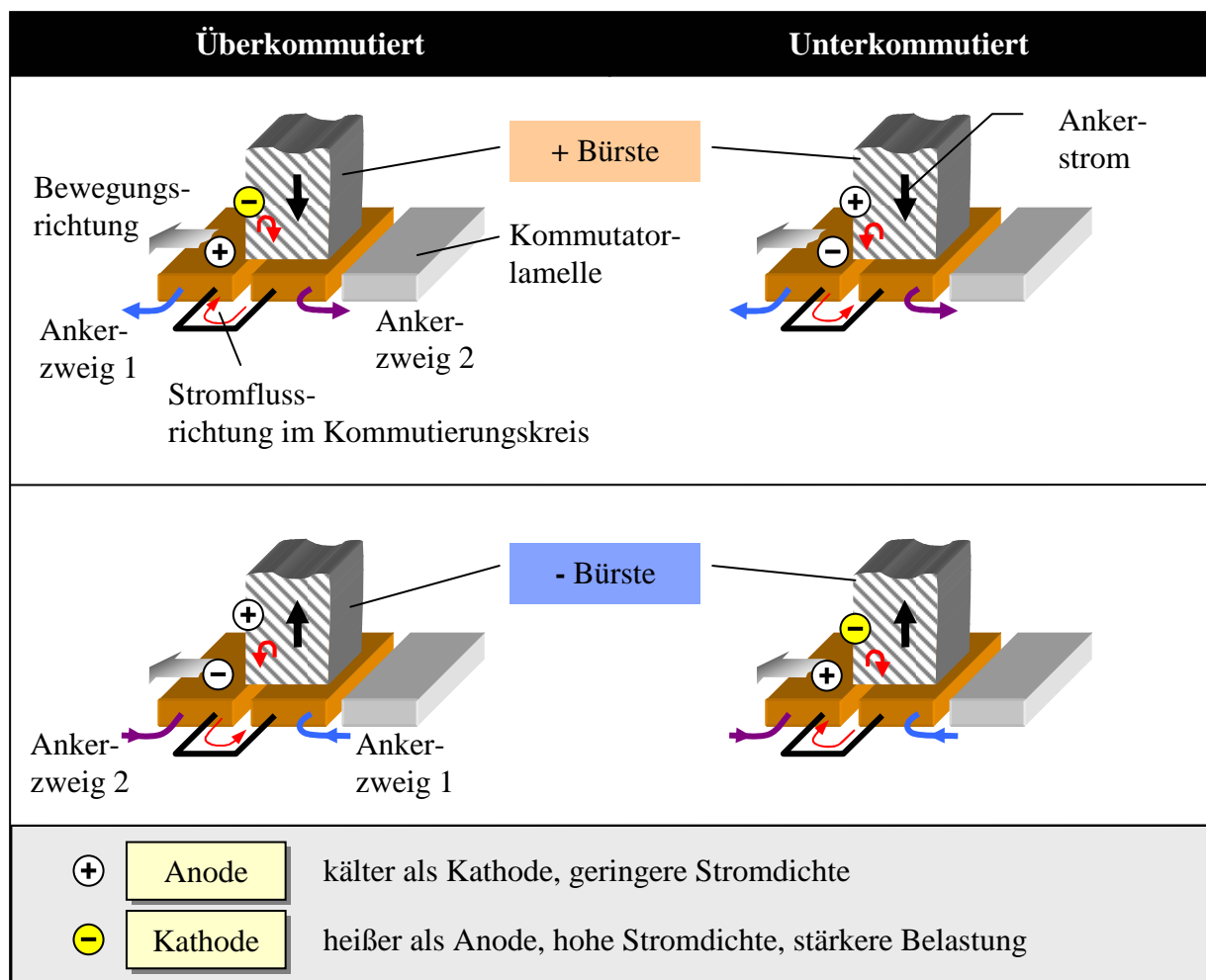


Bild 1 : Auswirkung von Über- und Unterkommütierung auf den Bürstenverschleiß im Zusammenhang mit der Polarität der Bürste

Es wird deutlich, wie bedeutend die Kenntnis des Vorliegens von Über- bzw.

Unterkommütierung für einen speziellen Arbeitspunkt ist. Das Verschleißverhalten der Bürsten wird direkt davon geprägt. Im weiteren wird eine messtechnische Möglichkeit zur Optimierung des Permanentmagnetmotors erläutert, die eine Aussage bezüglich der Kommütierung im Zusammenhang mit praktisch auftretenden Arbeitspunkten ermöglicht.

Grundlage der experimentellen Optimierung

Das Messen des kommütierenden Stromes ist bei den diskutierten Motoren kleiner Leistung nicht zuverlässig möglich. Als direkt elektrisch messbare Größen stehen der Motorstrom und die Ankerspannung zur Verfügung. Die Ankerspannung ist vom speisenden Netz eingepreßt und deshalb konstant. Die Abbildung der Kommütierung im Motorstrom ist nur gering ausgeprägt. Es sind lediglich Rückschlüsse auf das Kontakt- und Schaltverhalten der Bürste möglich. Für die Optimierung hinsichtlich Über- und Unterkommütierung muss eine Kopplung mit dem Kommütierungskreis geschaffen werden. Dazu wird eine Flussmessspule auf das Ständerjoch aufgelegt, sodass die notwendige Kopplung entsteht, aber der Motor nicht zerlegt werden muss.

Die Basis für das vorgestellte Verfahren bilden die unter [2] veröffentlichten Untersuchungen am Reihenschlussmotor. Die in der genannten Veröffentlichung ausgewertete Erregerspannung steht beim Permanentmagnetmotor nicht zur Verfügung. Trotzdem kann der Grundgedanke übernommen werden. Statt der Erregerspannung wird das Signal einer Flussmessspule digitalisiert und analysiert. Das Bild 2 zeigt eine Gegenüberstellung beider Messgrößen an Hand der schematischen Darstellung der Magnetkreise von Reihenschluss- und Permanentmagnetmotor. Die genutzte gemeinsame magnetische Verkettung ist mit einer unterbrochenen Linie dargestellt. Das Problem beim Permanentmagnetmotor stellt das in vielen Fällen massiv ausgeführte Ständerjoch dar. Es dämpft durch die Ausbildung von Wirbelströmen die Abbildung der Stromänderung des Kommütierungskreises in dem Signal der Flussmessspule.

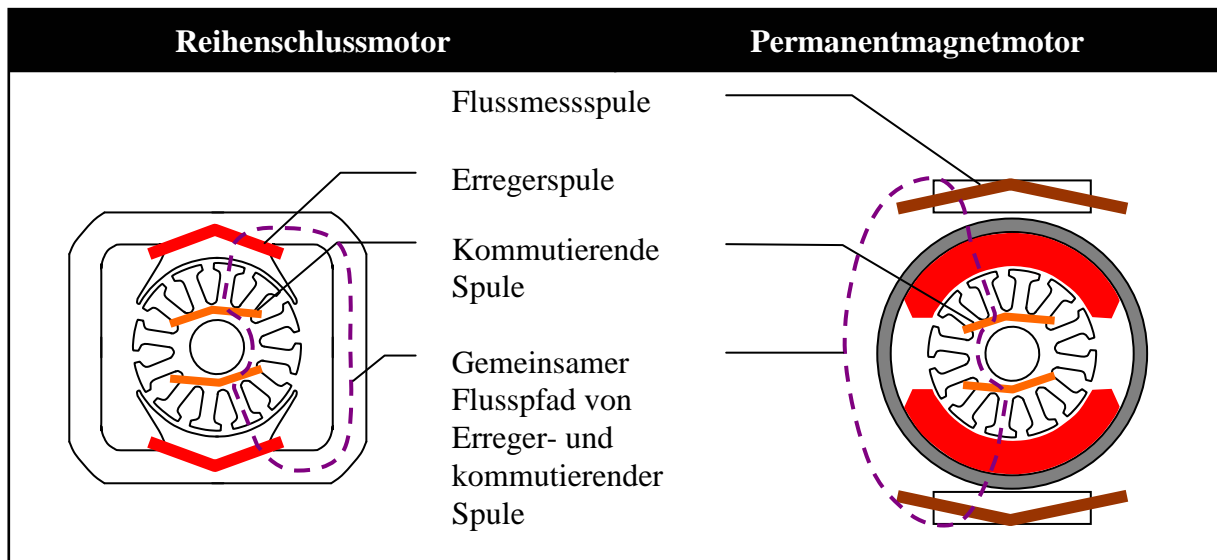


Bild 2 : Vergleich zwischen Reihenschlussmotor und Permanentmagnetmotor hinsichtlich der Messgröße zur Kommutierungsanalyse

Die Abbildung der Kommutierungsschaltspitzen ist deshalb verschliffen und verglichen mit der Erregerspannung beim Reihenschlussmotor weniger gut ausgeprägt.

Eine Messung an einem Reihenschlussmotor, an dem die Erregerspannung und die induzierte Spannung der Flussmessspule gleichzeitig erfasst und gegenübergestellt werden, zeigt im Bild 3 die grundsätzliche Gemeinsamkeit, aber auch die dämpfende Wirkung der Wirbelströme. Die Abbildung der Kommutierungsvorgänge ist weniger markant. Insbesondere Anteile höherer Frequenz und Spannungsspitzen kleinerer Amplitude werden durch die Felder von Wirbelströmen gedämpft und sind nicht mehr zu erkennen. Das Signal-/Rauschverhältnis stellt eine weitere Schranke dar. Die Empfindlichkeit der Messanordnung findet darin eine Grenze.

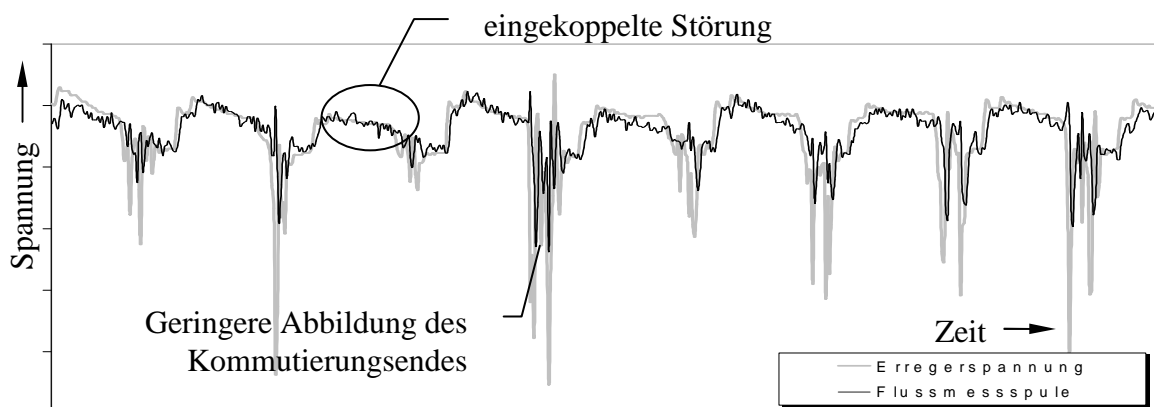


Bild 3 : Messkurven aus praktischem Beispiel für Erregerspannung und Flussmessspule

Für die Darstellung im Bild 4 wurde aus dem Verlauf von Bild 3 der Bereich einer

Läuferumdrehung ausgeschnitten und gemäß der Nutteilung des Motors überlagert. Die verstärkt gezeichnete Linie stellt den Mittelwert der überlagerten Kurven dar. Die hinterlegte Hüllkurve kennzeichnet den Bereich der einzelnen Kurven. Skaliert man bei beiden Signalen den Spannungsanstieg, der vom Beginn der Kommutierung herrührt auf gleiche Proportionen, treten für alle weiteren signifikanten Eckpunkte Differenzen auf. Die Flussänderung pro Zeiteinheit bestimmt die Spannung sowohl in der Erregerspaltung als auch in der Flussmessspule. Im Kurvenverlauf der Flussmessspule liegen sämtliche weiteren Schaltunkte auf niedrigerem Niveau. Die Abbildung des mit starken Flussänderungen verbundenen Kommutierungsendes ist durch den Einfluss der Wirbelströme deutlich geringer.

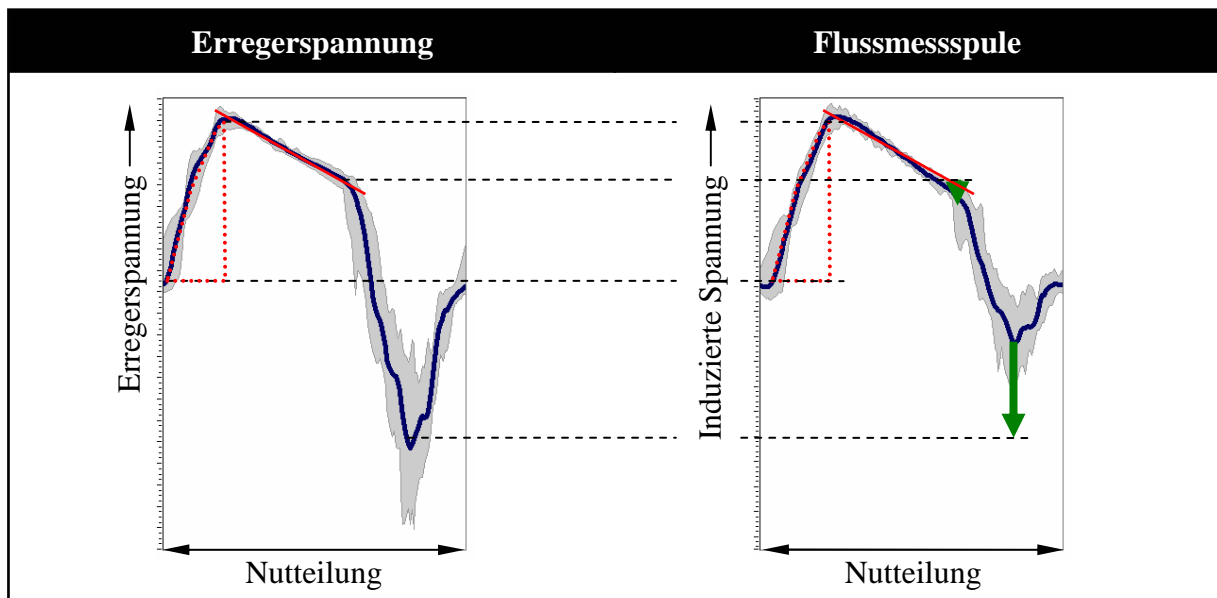


Bild 4 : Gegenüberstellung von Erregerspannung und Spannung der externen Flussmessspule

Optimierung der Bürstenbrückenverdrehung

Die Abbildung des Kommutierungsendes bei Über- bzw. Unterkommutierung ist qualitativ identisch mit der Abbildung in der Erregerspannung. Die wechselnde Orientierung der Spannungsspitze am Ende einer Kommutierung liefert die Unterscheidungsmöglichkeit. Für den Reihenschlussmotor wurde in [3] der Nachweis geführt.

Für den Permanentmagnetmotor soll am Beispiel eines Motors für eine Anwendung in elektrischen Haushaltgeräten die Abbildung von Über- und Unterkommutierung demonstriert werden. Die Arbeitspunkte des Motors werden durch eine veränderte

mechanische Belastung eingestellt. Gegenübergestellt werden die Zustände Leerlauf und drei Stufen mit jeweils steigender mechanischer Belastung. Die Spannung ist konstant. Die Drehzahl sinkt mit zunehmender Leistung entsprechend der natürlichen Motorkennlinie. Die veränderten Kommutierungsbedingungen bilden sich deutlich in den Kurven der induzierten Spannung der Flussmessspule ab (Bild 5).

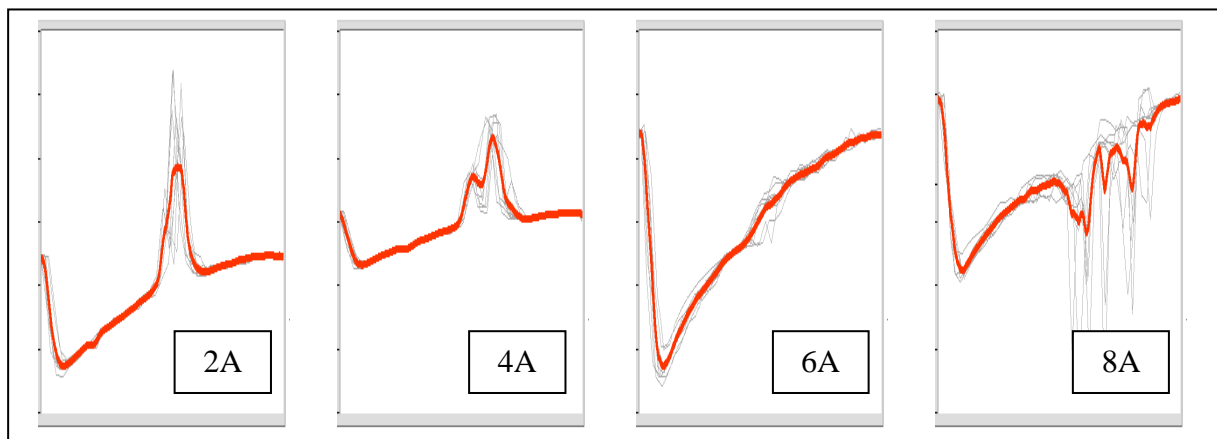


Bild 5 : Mittlerer Spannungsverlauf der Messspule über eine Nutteilung bei zunehmender mechanischer Belastung

Während der Beginn einer Kommutierung immer eine Flanke in gleicher Richtung nach sich zieht, wechselt die Orientierung der Abschaltspitze beim Übergang von Über- zur Unterkommütierung. Besonders deutlich wird es in der Hüllkurve von Bild 6. Liegen keine anderweitigen Informationen zur Lage der Schaltstellen der Kommutierung vor, ist eine wechselnde Belastung geeignet, die Schaltstellen im Spannungsverlauf der Flussmessspule auf die gezeigte Weise zu markieren.

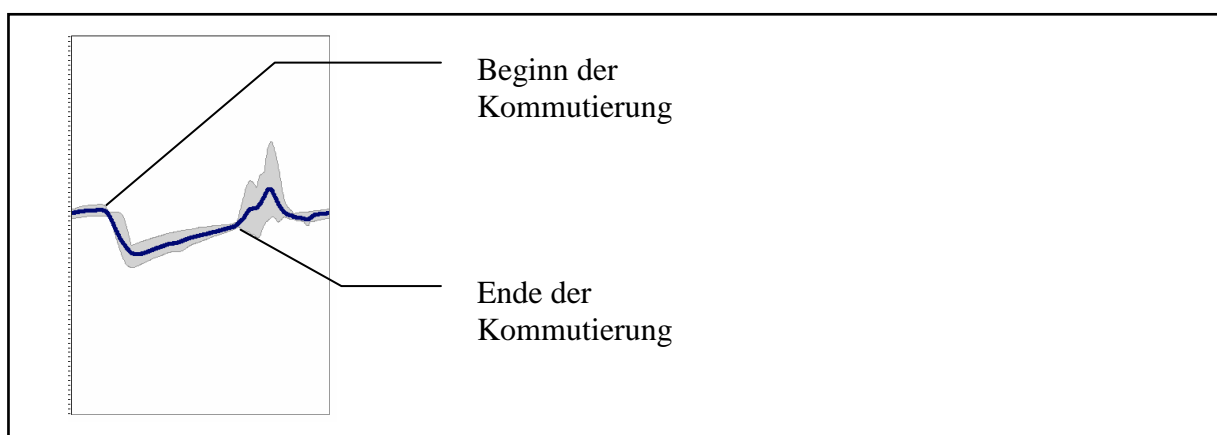


Bild 6 : Hüllkurve der im Bild 5 gezeigten vier Einzelmessungen bei variiertter Belastung

Einsatzbereich und Grenzen der Anwendbarkeit

Das vorgestellte Verfahren zur Optimierung der Kommutierung ist dazu geeignet, nach einer grundsätzlichen Auslegung des Motors eine Optimierung der Kommutierung hinsichtlich der Lebensdauer vorzunehmen. Im Vordergrund steht dabei die Anpassung der Kommutierung an die gewünschten Arbeitspunkte. Das vorgestellte Verfahren dient dabei als Werkzeug zur Beobachtung der Kommutierung. Außerdem können Probleme des Stromübergangs erkannt werden, die auch von mechanischer Ursache bedingt sein können. Die Grenzen des Verfahrens werden bei Arbeitspunkten erreicht, die ein magnetisch schwach ausgelastetes Ständerjoch aufweisen. Ist der erforderliche Bauraum für ein sonst nicht nötiges zusätzliches Präparieren im Inneren des Motors nicht vorhanden, ist eine sichere Anwendung des Verfahrens nicht mehr möglich.

References:

- [1] Noack F. : Einführung in die elektrische Energietechnik, 2003 Fachbuchverlag Leipzig
- [2] Möckel A. : Analyse der Erregerspannung hochtouriger Reihenschlussmotoren kleiner Leistung im Hinblick auf Kommutierung und Fehlererkennung, 2001 ISLE Verlag
- [3] Möckel A., Oesingmann D.: „Die Abbildung der Stromkommutierung von Kommutatorreihenschlussmaschinen in der Erregerspannung“, GMM - Fachtagung, Innovative Klein- und Mikroantriebe, Mainz, 15./16.5.2001, S. 13 – 22
- [4] Möckel A. ; Oesingmann D. : Das Verfahren der Nutteilungsanalyse, 48. IWK Ilmenau 2003

Author:

Dr.-Ing. Andreas Möckel, Dr.-Ing. Ronald Schuder
Technische Universität Ilmenau, FG Kleinmaschinen, Gustav Kirchhoff Straße 1, Postfach 10 05 65
98693, Ilmenau (Germany)
Phone: 03677 69 1544
Fax: 03677 69 1552
E-mail: andreas.moeckel@tu-ilmenau.de